УДК 621.37

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

В.М. Рулевский, Ю.Н. Дементьев, О.В. Бубнов

Томский политехнический университет
E-mail: Rulevsky@mail2000.ru

Проведен обзор современного состояния систем электропитания телеуправляемых подводных аппаратов и на основании полученных результатов предложена и реализована система электропитания СЭП-30 телеуправляемого подводного аппарата большой энерговооруженности для геологических исследований.

Необходимость оценки и вовлечения в промышленный потенциал минеральных ресурсов Мирового океана поставила задачу создания и эксплуатации подводных технических средств, обеспечивающих проведение геологических исследований на морском дне в пределах больших площадей с высокой качественной достоверностью. В наибольшей степени решению этой задачи на этапе региональных, поисковых и поисково-оценочных работ отвечают телеуправляемые подводные аппараты (ТПА), оснащенные научно-исследовательской аппаратурой.

Использование научно-исследовательской, фотографической и телевизионной аппаратуры на больших глубинах требует применения мощных осветительных приборов и двигателей со значительным энергопотреблением, работающих как в длительном, так и в импульсном режимах. Суммарная мощность токоприемников ТПА достигает нескольких киловатт, поэтому вопросы энергоснабжения данных систем приобретают весьма важное значение при проектировании подводных аппаратов.

Выбор систем электропитания (СЭП) ТПА определяется рядом требований, среди которых главную роль играют величина передаваемой мощности, время непрерывной работы без поднятия аппарата на борт обеспечивающего судна (ОС) и объем информации, которой обмениваются между собой аппарат и буксировщик [1]. Все СЭП условно делятся на две группы в зависимости от места расположения первичного источника электроэнергии: с автономным источником электроэнергии на ТПА и подключенные к электрической сети судна-буксировщика.

В качестве первичных источников электроэнергии в автономных СЭП наибольшее применение находят аккумуляторные батареи различных типов, а также могут использоваться топливные элементы и, в некоторых случаях, генераторы постоянного или переменного тока с приводом от гидравлической турбины, приводимой в действие при движении аппарата.

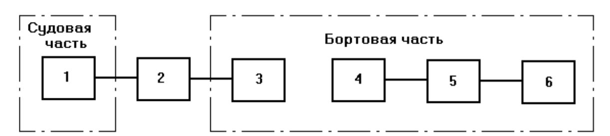


Рис. 1. *Аккумуляторный вариант СЭП: 1) судовая аппаратура ВЧС; 2) линия связи (кабель-трос); 3) бортовая аппаратура ВЧС; 4) аккумуляторная батарея; 5) преобразователь; 6) токоприемники бортовой части (БЧ)*

На рис. 1 представлен аккумуляторный вариант СЭП, при котором обмен информацией между ОС и ТПА комплекса, осуществляется с помощью аппаратуры высокочастотной связи (ВЧС) по коаксиальной паре грузонесущего кабель-троса.

Основным достоинством приведенной СЭП является гальваническая развязка ее цепей и канала связи, что позволяет до минимума снизить помехи. К недостаткам следует отнести [2]:

– ограниченное время буксировки, определяемое емкостью аккумуляторов;
– значительные массо-габаритные параметры бортовой части СЭП;
– усиленный износ кабель-троса из-за частых подъемов-спусков ТПА для подзаряда аккумуляторов.

Перечисленные выше недостатки, а также высокие эксплуатационные расходы указывают на целесообразность замены автономного питания СЭП централизованным с ОС.

Требованиям, предъявляемым к системам электропитания буксируемых кабель-тросом подводных аппаратов, наиболее полно удовлетворяет СЭП с объединенным энергетическим и информационным каналом. Основные трудности при ее реализации связаны с защитой информационного канала от помех со стороны энергетического. Кроме того, коаксиальная пара кабель-трос объединенного канала отличается значительным затуханием, что ограничивает верхнюю границу частот передачи и объем передаваемой информации. В последние годы с развитием техники и технологии произошла замена коаксиального кабель-троса на кабели, включающие в себя кроме токонесущих жил, предназначенных для питания ТПА, дополнительные витые пары и оптоволоконные линии, обеспечивающие надежный обмен информацией между ТПА и устройствами на борту обеспечивающего судна.

Питание ТПА обеспечивающего судна по кабель-тросу может осуществляться на переменном и постоянном токе.

Рассмотрим несколько вариантов СЭП на переменном токе.

Структурная схема СЭП (рис. 2) позволяет увеличить время буксировки за счет питания токоприемников бортовой части от судовой сети буксировщика, которая на современных судах выполняется

трехфазной, напряжением 380 В и частотой 50 Гц. Реализация данной СЭП связана с введением дополнительных громоздких заградительных фильтров – 3, 7, предназначенных для обеспечения полосы пропускания низких частот, и установкой трансформаторов – 2, 8, габариты которых для промышленной частоты 50 Гц велики. Нестабильность напряжения на токоприемниках – 9 подводного аппарата будет определяться колебаниями напряжения трехфазной сети переменного тока ОС и падением напряжения в сопротивлении кабеля линии связи – 5 при изменениях тока нагрузки [1].

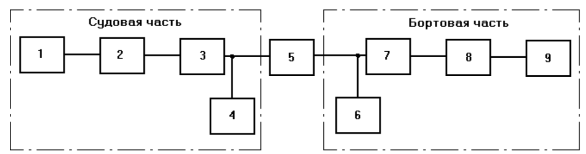


Рис. 2. *Трансформаторный вариант СЭП: 1) судовая сеть переменного тока; 2) повышающий трансформатор; 3, 7) заградительные фильтры; 4, 6) аппаратура ВЧС; 5) линия связи; 8) понижающий трансформатор; 9) токоприемники БЧ*

Построение СЭП с применением индуктивно-емкостных преобразователей и промежуточного стабилизированного преобразователя, повышающего частоту на входе линии до 400...1000 Гц, позволяет уменьшить массо-габаритные параметры заградительных фильтров и согласующего трансформатора. При этом исключается влияние падения напряжения в кабельной линии связи за счет постоянства тока в линии при изменениях нагрузки.

Характеристики СЭП на переменном токе значительно улучшаются введением регулятора напряжения на передающем конце кабеля, обеспечивающего стабилизацию напряжения на приемном конце кабеля независимо от нагрузки.

В регуляторе напряжения ОС может быть реализован любой из известных способов регулирования переменного напряжения, однако предпочтение следует отдать вариантам, обеспечивающим минимальное искажение формы выходного напряжения, чтобы упростить заградительные фильтры:

– регулирование возбуждением генератора при применении в качестве первичного источника электроэнергии преобразователя мотор-генератора;
– использование вольтодобавки, регулируемой фазовым способом при помощи тиристоров;
– использование статического преобразователя с максимально приближенной к синусоиде формой напряжения.

Построение СЭП значительно упрощается, если осуществлять передачу энергии на постоянном токе. Возможные варианты структурных схем СЭП на постоянном токе приведены на рис. 3.

Недостатком данной СЭП (рис. 3, *а*) являются низкие массогабаритные характеристики расположенной на ОС части СЭП, обусловленные наличием сглаживающего фильтра и согласующего трансформатора, типовая (габаритная) мощность которого на частоте питающей сети 50 Гц составляет 105...110 % от выходной мощности выпрямителя – 3. Реальным путем устранения указанного недостатка и улучшения электромагнитной совместимости энергетического и информационного каналов является введение в СЭП регулируемого выпрямителя на базе тиристорного преобразователя с фазосдвигающим трансформатором.

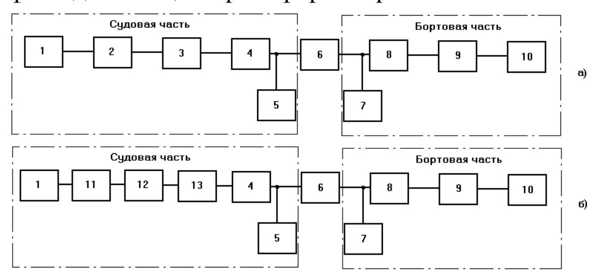


Рис. 3. *Варианты СЭП на постоянном токе: 1) судовая сеть; 2) согласующий трансформатор; 3) регулируемый выпрямитель с фильтром; 4, 8) заградительные фильтры; 5, 7) аппаратура ВЧС; 6) линия связи; 9) автономный инвертор; 10) нагрузка; 11) нерегулируемый выпрямитель; 12) автономный регулируемый инвертор с согласующим трансформатором; 13) нерегулируемый выпрямитель с фильтром*

На современном уровне развития преобразовательной техники и полупроводниковой элементной базы одним из основных путей увеличения удельной мощности и повышения качества устройств преобразования энергии является преобразование напряжения и тока на повышенных частотах.

Преобразователь (рис. 3, *б*) на обеспечивающем судне выполнен со звеном повышенной частоты.

В части ТПА СЭП обоих вариантов выполнены на базе автономного нерегулируемого инвертора с согласующим трансформатором и выпрямителя на выходе, работающего также на повышенной частоте, обладающие хорошими массогабаритными и энергетическими характеристиками.

С целью дальнейшего улучшения массогабаритных характеристик судовую часть СЭП можно выполнить по схеме с вольтодобавкой (рис. 4). При этом напряжение на ТПА может быть представлено как $U_{па}=U_{вых}+U_{ВДУ}-I_л R_л$, где $U_{па}$ – напряжение на входе подводного аппарата; $U_{вых}$ – выходное напряжение; $U_{ВДУ}$ – напряжение вольтодобавки; $I_л$, $R_л$ – ток и сопротивление линии связи. Отсюда напряжение вольтодобавки находится из выражения:

$$U_{ВДУ} = \frac{1}{T}\int_0^{t_и} K_T U_{вых}\,dt = U_{па} + I_л R_л - U_{вых} ,$$

где T – период; $t_и$ – время импульса; K_T – коэффициент трансформации трансформатора вольтодобавки.

Системы с вольтодобавочными устройствами (ВДУ) позволяют уменьшить мощность согласующего трансформатора и величину пульсации на входе линии связи.

Как было сказано ранее, питание ТПА с обеспечивающего судна по кабель-тросу может осуществляться на переменном и постоянном токе. СЭП

на переменном токе повышенной частоты (более 50 Гц) в настоящее время являются наиболее простыми в выполнении и обслуживании, а также приводят к улучшению массо-габаритных показателей систем в целом по сравнению с СЭП на постоянном токе и переменном токе промышленной частоты.

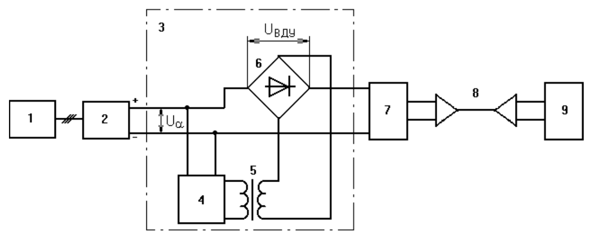


Рис. 4. *Судовая часть СЭП ТПА по схеме с вольтодобавкой: 1) судовая сеть; 2) выпрямитель; 3) устройство вольтодобавки; 4) инвертор; 5) трансформатор вольтодобавки; 6) выпрямитель; 7, 9) аппаратура ВЧС и заградительные фильтры; 8) линия связи*

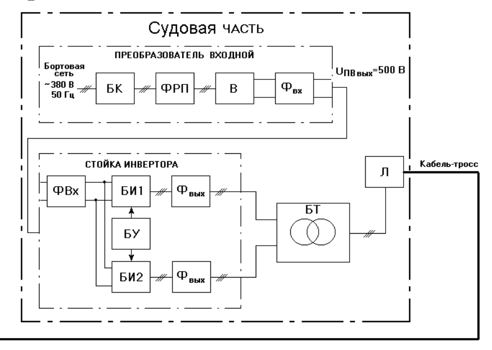
Таким образом, на основании проведенного анализа построения систем электропитания современных ТПА в НИИ АЭМ г. Томска была предложена и реализована на практике система электропитания телеуправляемого подводного аппарата большой энерговооруженности СЭП-30, со звеном повышенной частоты, которая обеспечивает непрерывное энергообеспечение подводного аппарата мощностью до 30 кВт. Функциональная схема данной системы представлена на рис. 5.

Система электропитания СЭП-30 структурно состоит из двух частей: судовой и бортовой. Судовая часть в свою очередь функционально состоит из входного преобразователя и стойки инвертора, а бортовая часть – из заглубителя и системы электропитания, расположенной непосредственно на борту ТПА.

На сетевые разъемы СЭП (рис. 5) подается трехфазное напряжение корабельной сети (380 В, 50 Гц) с изолированной нетралью и поступает на блок коммутации (БК), где установлен автоматический выключатель, подключающий СЭП-30 к сети. С автоматического выключателя входное напряжение поступает на фильтр радиопомех (ФРП), обеспечивающий помехоподовление по каждой фазе питающего напряжения, и с выхода ФРП подается на входной выпрямитель и устройство питания собственных нужд, расположенное в блоке управления (БУ), и формирующее питания схем управления СЭП-30.

Выпрямленное трехфазное напряжение с выпрямителя сглаживается LC-фильтром, дроссели и часть конденсаторов которого находятся в стойке входного преобразователя. В стойке инвертора расположена вторая часть конденсаторов входного фильтра ($Ф_{вх}$) и датчики тока LEM [4], контролирующие входной ток двух трехфазных инверторов БИ1 (блок инвертора) и БИ2.

Управление трехфазными инверторами осуществляется с БУ. С выхода инверторов выходное напряжение через блоки выходных фильтров ($Ф_{вых}$) поступает через выходные разъемы на силовые трехфазные трансформаторы БТ. На задней панели стойки так же расположены разъемы для внешней синхронизации и для подключения к устройству контроля изоляции.



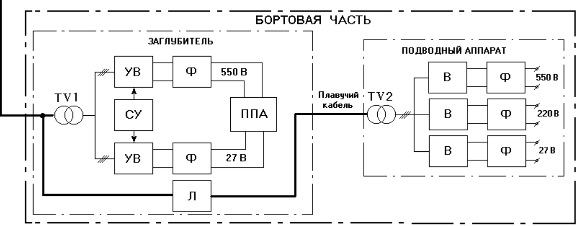


Рис. 5. *Функциональная схема СЭП-30: БК) блок коммутации; ФРП) фильтр радиопомех; В) нерегулируемый выпрямитель; $Ф_{вх}$) входной фильтр; БИ) блок инвертора; Л) лебедка; БУ) блок управления; $Ф_{вых}$) выходной фильтр; БТ) блок трансформаторов; УВ) управляемый выпрямитель; СУ) система управления; ППА) приемопередающая аппаратура; TV1 и TV2) согласующие трансформаторы*

В стойке инвертора расположены два $Ф_{вых}$, каждый из которых является выходным фильтром для одного из двух трехфазных инверторов. На выходе $Ф_{вых}$ в каждой фазе стоят трансформаторы; с вторичных обмоток трансформаторов снимается обратная связь по выходному напряжению. К дополнительным обмоткам подключен прибор БУ, измеряющий выходное напряжение СЭП.

В состав БУ входят устройства:

1. Питания и защиты (УПиЗ), устройство питания (УП), предназначенные для питания собственных нужд СЭП.
2. Управления контакторами (УУК).
3. Измерения и контроля (УИК).
4. Управления (УУ-1 и УУ-2).

Устройство питания и защиты предназначено для формирования питающих напряжений собственных нужд СЭП. Также в УПиЗ находится схема контроля напряжений, который при просадке одного из напряжений выдает сигнал на срабатывание защиты в УУ-2.

Устройство управления конструктивно разбито на две платы УУ-1 и УУ-2, при помощи которых осуществляется управление трехфазными инверторами и формирование трехфазного синусоидального напряжения.

Таким образом, стойка инвертора формирует два трехфазных напряжения $U_л$=300 В и f=651 Гц, кото-

рые поступают на БТ. Вторичные обмотки силовых трансформаторов соединены между собой последовательно по схеме "звезда" и имеют коэффициент трансформации, равный 4. Таким образом, мы имеем на выходе трансформаторов (на входе в кабель) максимальное напряжение 2400 В (величина этого напряжения ограничена параметрами кабеля).

Это напряжение с учетом падения на кабель-тросе подается на заглубитель, где поступает на лебедку и понижающий трансформатор TV1. Со вторичных обмоток TV1 напряжение подается на два трехфазные управляемые выпрямители, формирующие напряжения 550 и 27 В для питания ППА.

Трехфазные управляемые выпрямители выполнены на тиристорах, а управление осуществляется системой управления построенной по следящему принципу регулирования выходного напряжения (асинхронная система управления). Этот принцип основан на обеспечении равенства среднего значения сигнала обратной связи, пропорционального выпрямленному напряжению, среднему значению напряжения задания на интервале между последней с углом α_n и очередной с углом управления α_{n+1} коммутациями в выпрямителе. Это позволяет постоянно поддерживать постоянство выходного напряжения в заданном диапазоне.

С выхода лебедки, по плавучему кабелю, напряжение поступает на TV2, с вторичных обмоток запитываются три неуправляемых выпрямителя. Выпрямленное напряжение поступает на блоки фильтров, и с выхода подводной части системы электропитания снимаются три напряжения постоянного тока: 550, 220 и 27 В.

Таким образом, на основании выполненного анализа существующих СЭП, их преимуществ и недостатков была предложена структурная схема системы, которая была реализована на практике. Данная система электропитания отвечает всем требованиям, обладает хорошими массогабаритными характеристиками, за счет использования промежуточного звена повышенной частоты и обеспечивает непрерывное энергообеспечение подводного аппарата мощностью до 30 кВт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ястребов В.С. Телеуправляемые подводные аппараты. – Л.: Судостроение, 1985. – 232 с.
2. Подводные аппараты для геологических исследований / Под ред. А.М. Игнатова. – Геленджик: ПО "Южморгеология", 1990. – 92 с.
3. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники Учебное пособие. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
4. http://www.tvelem.ru
5. Хоровиц П., Хилл У. Исскуство схемотехники: Пер. с англ. – Изд. 6-е. – М.: Мир, 2003. – 704 с.
6. Гальперин М.В. Практическая схемотехника в промышленной автоматике. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
7. Источники электропитания на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчет / Под ред. С.Д. Додика, Е.И. Гальперина. – М.: Советское радио, 1969. – 448 с.
8. Лившиц А.Л., Отто М.А. Импульсная электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с.
9. Розанов Ю.К. Основы силовой преобразовательной техники. – М.: Энергия, 1979. – 392 с.

УДК 621.313